

INTRODUÇÃO À MEDIÇÃO DE VAZÃO

Notas de Aula do Curso:

Métodos Experimentais para Engenharia Mecânica

Prof. Luís Fernando A. Azevedo
Departamento de Engenharia Mecânica
PUC-Rio

1. Introdução

Vazão é uma das grandezas mais utilizadas na indústria. As aplicações são inúmeras, indo desde a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até medição de gases industriais e combustíveis, passando por medições mais complexas como a vazão de sangue no sistema circulatório.

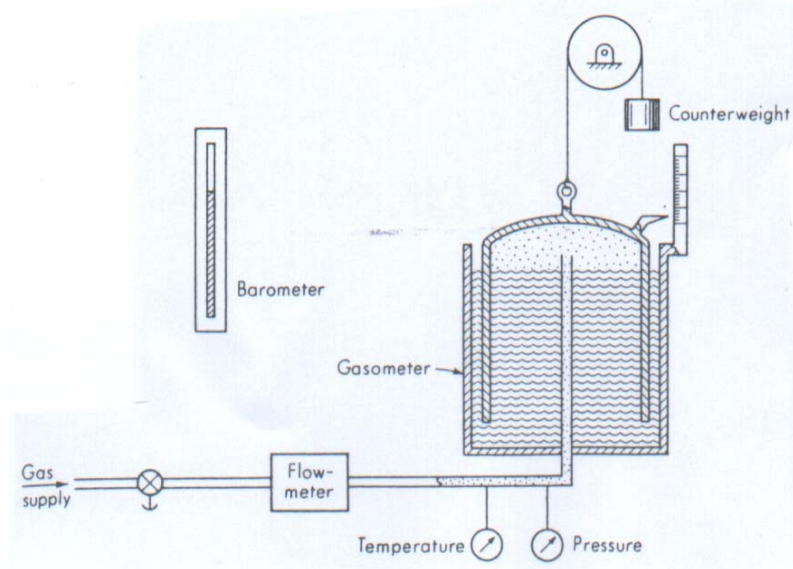
Para se ter uma idéia da importância comercial da medição de vazão, tomemos o exemplo do gasoduto Bolívia-Brasil que transporta gás natural da Bolívia até São Paulo. Este gasoduto está projetado para transportar até 30 milhões de metros cúbicos por dia de gás natural. Estimando-se um custo de venda de U\$ 0,50 por metro cúbico, vê-se que um erro sistemático de apenas 1% em um medidor de vazão está associado a uma quantia de cerca de U\$ 150.000 por dia.

A escolha correta de um determinado instrumento para medição de vazão depende de vários fatores. Dentre estes, pode-se destacar:

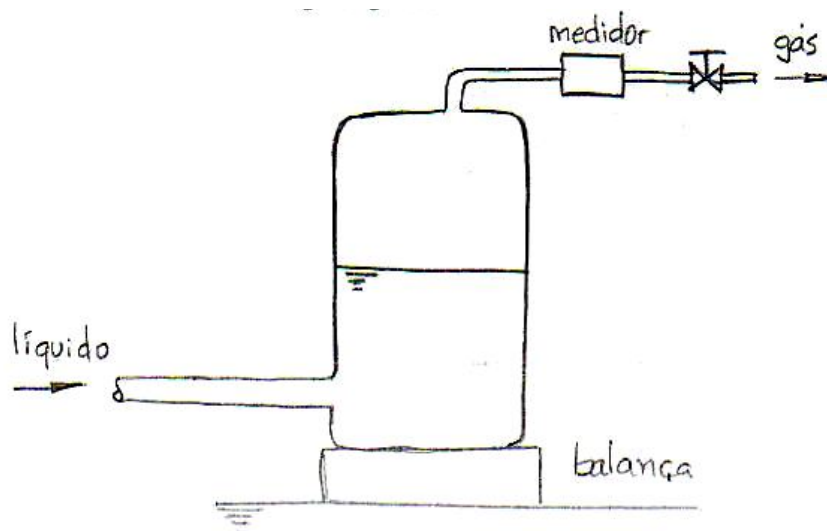
- exatidão desejada para a medição
- tipo de fluido: se líquido ou gás, limpo ou sujo, número de fases, condutividade elétrica, transparência, etc.
- condições termodinâmicas: níveis de pressão e temperatura nos quais o medidor deve atuar (entre outras propriedades)
- espaço físico disponível
- custo, etc.

2. Aferição e Padrões

A aferição de medidores de vazão é baseada em padrões de volume (comprimento) e tempo, no caso de vazão volumétrica, e massa e tempo, no caso de vazão mássica. No caso de líquidos, mede-se o tempo necessário para encher um volume conhecido ou volume acumulado em um dado tempo. Variando-se o volume e o tempo pode-se atingir baixos níveis de incerteza experimental no procedimento de calibração.



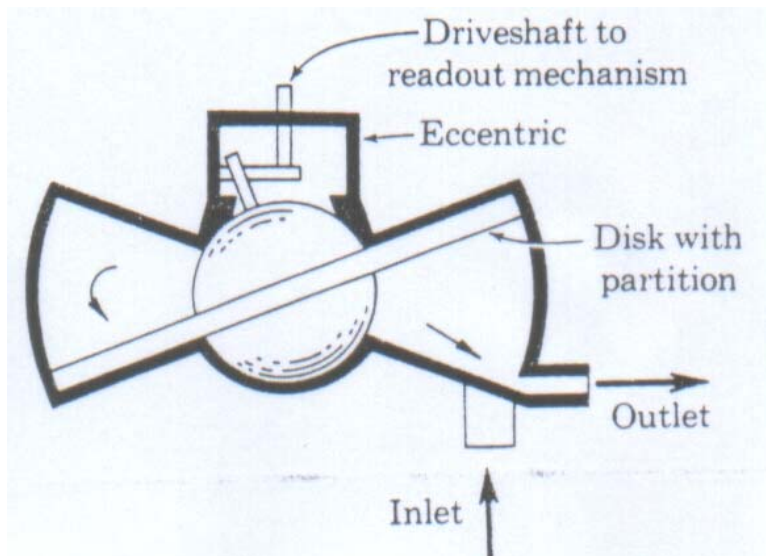
Para o caso de gases, mede-se o tempo necessário para deslocar um volume conhecido de gás à pressão e temperatura constantes. Quando se deseja realizar aferições a pressões superiores à atmosférica, pode-se utilizar um pistão de líquido, conforme mostrado na figura seguinte.



3. Instrumentos de Medição de Vazão de Deslocamento Positivo

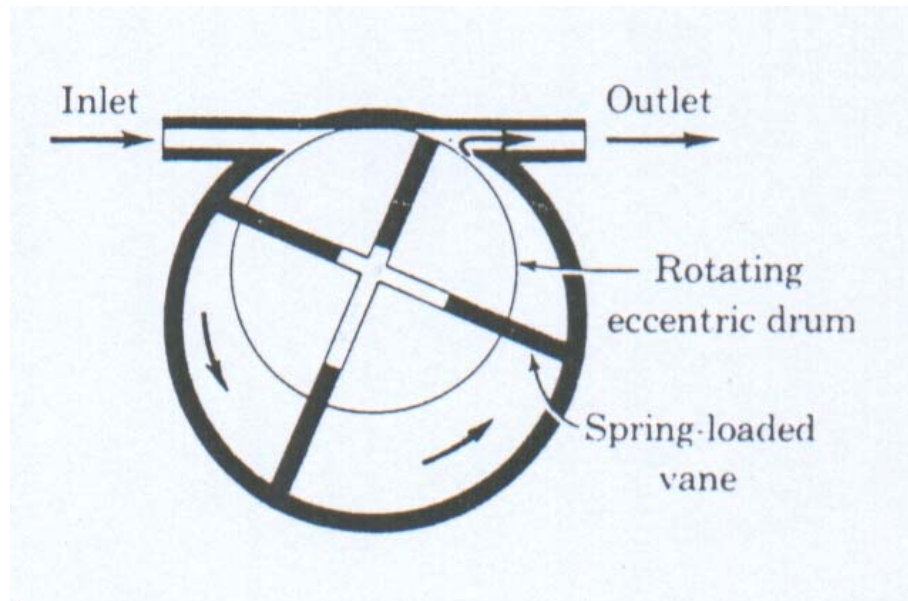
Estes medidores de vazão são, na realidade, motores movidos pela passagem de fluido. O número de rotações do motor está associado à vazão do fluido. A seguir são apresentados alguns tipos de medidores de vazão de deslocamento positivo.

3.1 - Medidor de Disco Nutante



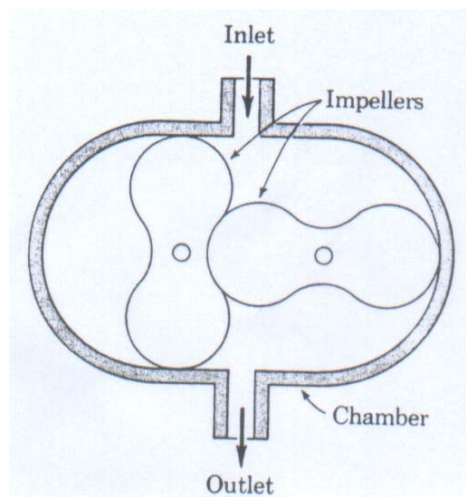
Este tipo de medidor é muito utilizado na medição do consumo doméstico de água. A exatidão típica esperada para um medidor deste tipo é da ordem de 1 a 2%.

3.2 - Medidor de Palhetas



Para este medidor a exatidão típica é da ordem de 0,5 %.

3.3 - Medidor de Lóbulos



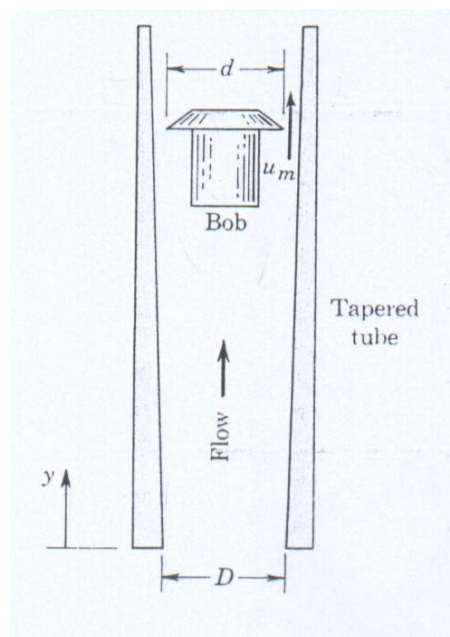
3.4 - Bombas Medidoras

Bombas de deslocamento positivo, quando projetadas e construídas de maneira adequada, podem ser usadas simultaneamente para bombear e medir a vazão do fluido. Exatidões da ordem de 1~2% são típicas destas bombas.

4. Medidores de Área Variável - Rotâmetros

Estes medidores são largamente empregados na indústria e em laboratórios. Eles baseiam-se na força de arraste exercida pelo fluido sobre um “flutuador” colocado dentro de um tubo cônico de material transparente. A posição de equilíbrio do “flutuador” pode ser relacionada com a vazão do fluido.

Pela sua construção e princípio de funcionamento, estes medidores estão limitados a montagens na posição vertical, podendo somente operar com fluidos transparentes.



No equilíbrio, força de arraste + empuxo = peso

$$F_d + \rho_f V g = \rho V g$$

onde, ρ_f é a massa específica do fluido, ρ a massa específica do flutuador, V é o volume do flutuador e g é o módulo da aceleração da gravidade. A força de arraste sobre o flutuador pode ser avaliada por,

$$F_d = C_d A \frac{\rho_f u_m^2}{2}$$

onde, C_d é o coeficiente de arraste, A a área frontal do flutuador e u_m a velocidade média no espaço anular entre o flutuador e a parede.

Resolvendo para u_m ,

$$u_m = \left[\frac{1}{C_d} \cdot \frac{2gV}{A} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_f} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

A vazão volumétrica é dada por,

$$Q = A^* u_m, \text{ com } A^* = \left[(D + ay)^2 - d^2 \right] \cdot \frac{\pi}{4}$$

onde a é uma constante indicativa da inclinação do cone e D é o diâmetro da base do cone.

Note que o coeficiente de arraste C_d depende do número de Reynolds do escoamento e, conseqüentemente, da viscosidade. Flutuadores especiais são fabricados de maneira a minimizar esta dependência.

Muitos rotâmetros são fabricados de modo que a relação de A^* com y seja linear, e não quadrática como na equação acima. Neste caso, a vazão mássica é da por,

$$\dot{m} = C^* y \sqrt{(\rho_f - \rho) \rho_f}$$

onde C^* é uma constante característica do medidor.

Uma alternativa à geometria tradicional de rotâmetro é apresentada na figura abaixo. Neste modelo, o tubo de vidro possui seção reta constante, sendo a passagem cônica provida pelo eixo cônico interno. As vantagens deste modelo sobre os tradicionais são meramente construtivas: é muito mais simples usinar um cone externo

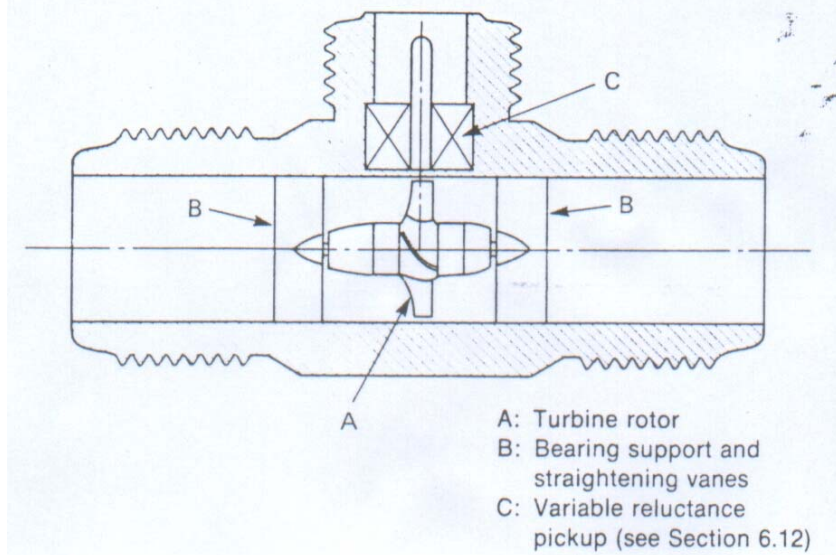
do que um cone interno. Por esta razão, ele pode ser facilmente fabricado no laboratório. Eixos cônicos de diferentes ângulos ampliam a faixa de vazão do medidor. Este rotâmetro foi concebido pelo técnico do laboratório de Termociências da PUC-Rio Jandir da Cunha e parece ser uma concepção original.



5. Medidor de Turbina

Quando uma roda de turbina é colocada dentro de um escoamento confinado em um tubo, a rotação da turbina é proporcional à vazão do fluido. Para turbinas construídas com pequenas perdas mecânicas, a relação entre vazão e rotação é aproximadamente linear. A vazão é obtida a partir da contagem da rotação que pode ser feita facilmente por um sensor magnético e um ímã colocado na ponta de uma das pás da turbina.

Figure 15.18 Turbine-type flowmeter.



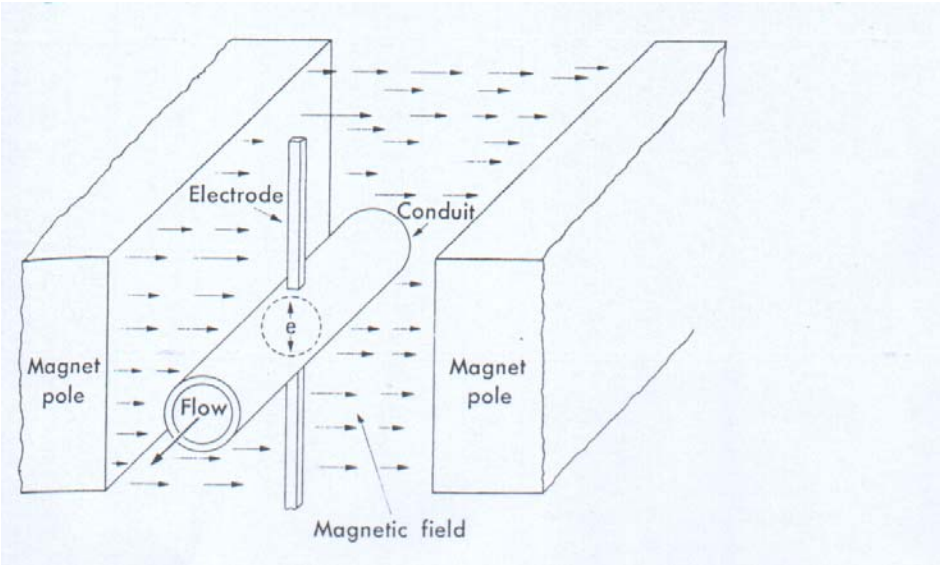
6. Medidores Magnéticos

Um fluido condutor movendo-se dentro de um campo magnético gera um campo elétrico de acordo com a expressão:

$$E = B l V$$

onde E : tensão elétrica induzida
 B : densidade de fluxo magnético
 l : comprimento do condutor
 V : velocidade do condutor

Dois tipos de medidores existem. Um para fluidos pouco condutores, outro para fluidos condutores (como metais líquidos).



7. Medidor de Vórtices

Alguns medidores utilizam como princípio básico de funcionamento a medição do período de formação de vórtices gerados em obstáculos colocados no escoamento. A passagem dos vórtices é registrada por sensores de pressão do tipo piezoelétrico ou por extensômetros que registram esforços laterais gerados pelos vórtices. A frequência de produção dos vórtices é proporcional à velocidade do escoamento, o que permite a avaliação da vazão.

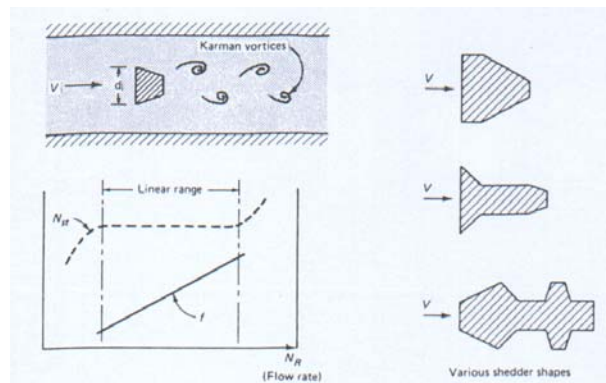


Figure 7.45 Vortex-shedding flowmeter principles.

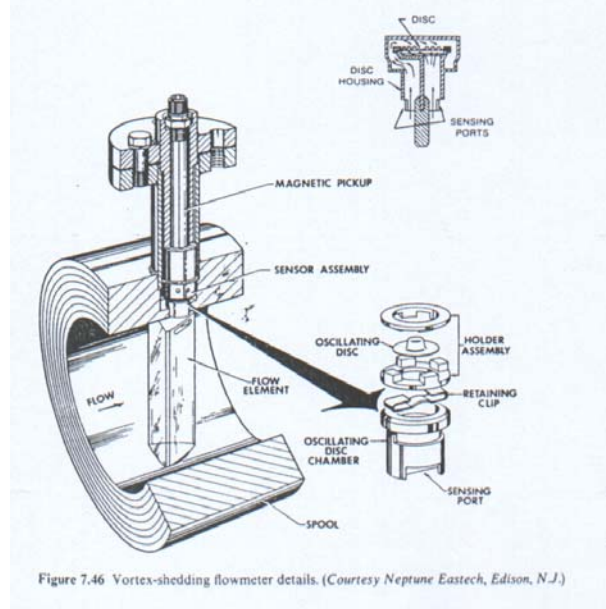
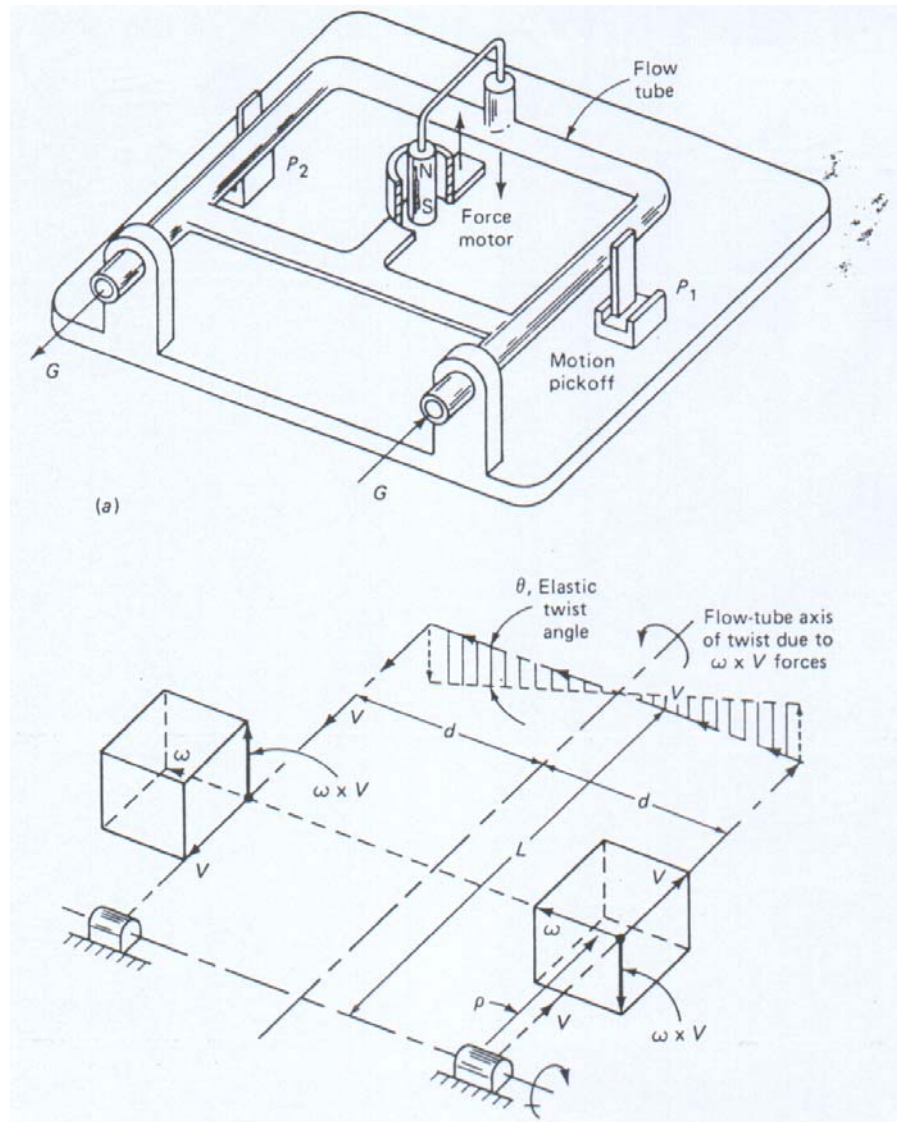


Figure 7.46 Vortex-shedding flowmeter details. (Courtesy Neptune Easstech, Edison, N.J.)

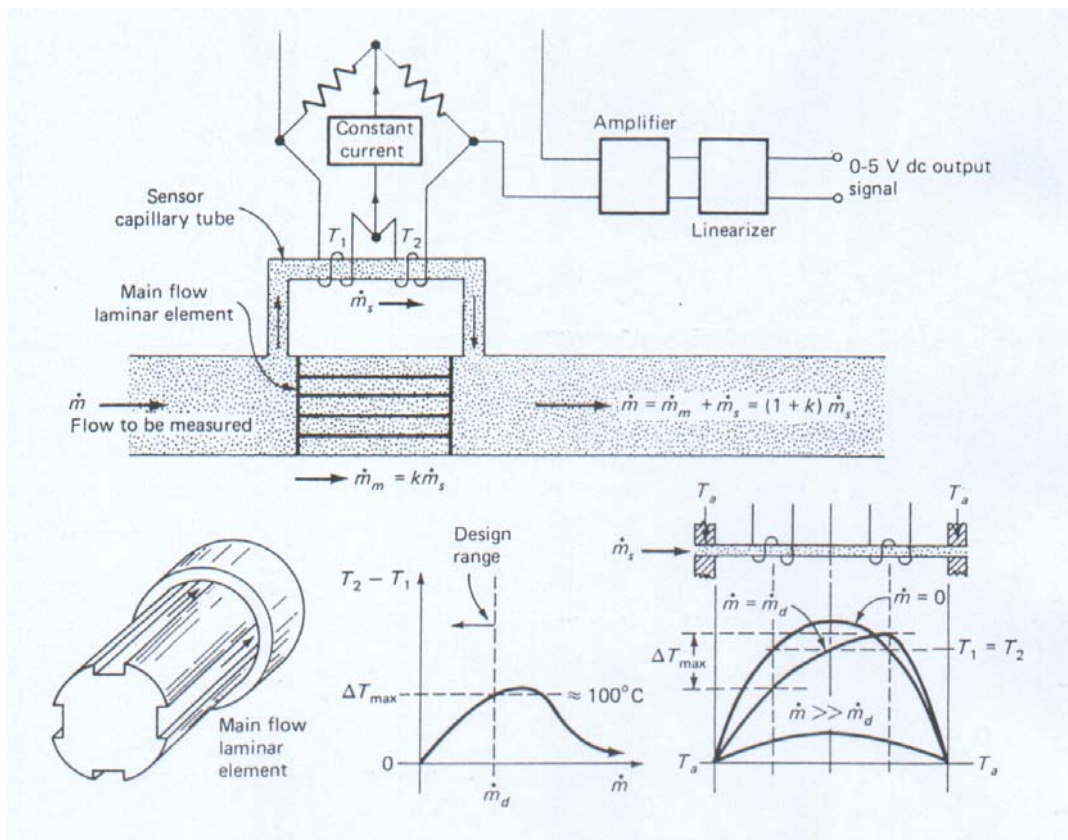
8. Medidor de Coriolis

O medidor de Coriolis indica a vazão mássica de fluido. Um tubo em U é excitado externamente de modo a vibrar. A passagem do fluido pelo tubo vibrante produz esforços alternados devido à força de Coriolis, o que provoca uma torção do tubo. Esta amplitude de torção é registrada eletronicamente sendo proporcional à vazão mássica. Este medidor pode ser usado tanto para líquido quanto para gases.

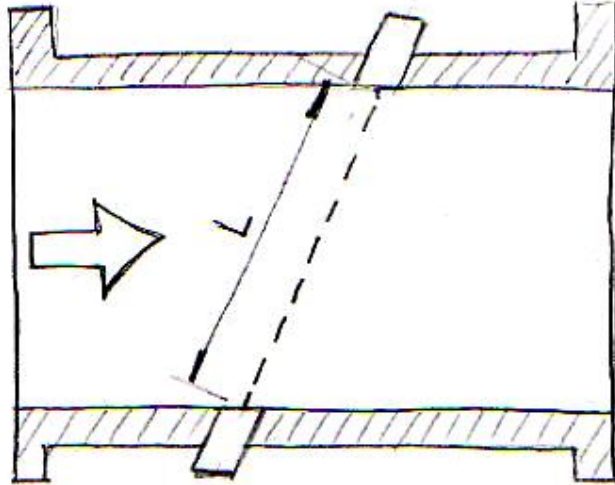


9. Medidor de Vazão por Efeito Térmico

O medidor por efeito térmico é também um medidor de vazão mássica. O fluido passa no tubo sensor, onde duas bobinas idênticas são enroladas externamente ao tubo. Estas bobinas funcionam tanto como sensores de temperatura quanto aquecedores. No caso de vazão nula pelo tubo, o perfil de temperatura na parede do tubo (perfil longitudinal) será simétrico. Os dois sensores terão, assim, leituras de resistência idênticas. Quando há escoamento, o perfil torna-se não simétrico com a segunda bobina exposta a um nível de temperatura superior. A diferença de temperatura (diferença de resistência) das duas bobinas é proporcional à vazão mássica.



10. Medidor de Vazão Ultrasônico



Assumindo um perfil uniforme de magnitude V , podemos calcular o tempo de trânsito de uma onda partindo do transmissor 1 e chegando ao receptor 2.

$$t_1 = \frac{L}{C + V \cos \theta}$$

Para uma onda partindo do transmissor 2, o tempo de trânsito é,

$$t_2 = \frac{L}{C - V \cos \theta}$$

Combinando as duas equações,

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2V \cos \theta}{L}$$

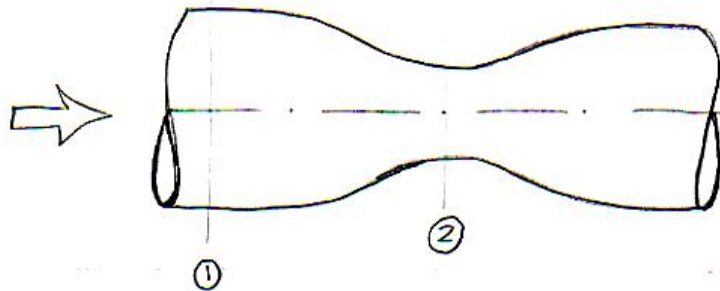
Pode-se observar que a diferença de tempos é uma indicação da velocidade média do escoamento que, por sua vez, pode ser relacionada com a vazão através de um procedimento de calibração. A velocidade de propagação, C , pode também ser determinada, o que fornece uma indicação sobre a massa específica do produto passando pelo medidor.

O medidor ultrasônico baseado no procedimento descrito acima pode apresentar indicações diferentes para escoamentos com a mesma velocidade média, porém com

formas distintas do perfil de velocidade. Para contornar este problema, medidores com múltiplos pares de sensores/detectores distribuídos circunferencialmente são utilizados.

10. Medidores de Vazão por Diferença de Pressão

Talvez os medidores mais amplamente utilizados baseiam-se na utilização de algum tipo de restrição na área de escoamento e na medição da queda de pressão através da restrição.



Para um fluido incompressível escoando através de uma secção de tubo com variação de área, podemos escrever a equação que governa a conservação de massa unidimensional,

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

Considerando um escoamento na horizontal sem atrito viscoso, a equação de Bernoulli fornece,

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2}$$

Resolvendo as duas equações para a vazão ideal, \dot{m}_{ideal} , e assumindo ρ constante,

$$\dot{m}_{ideal} = \rho_2 A_2 V_2 = \frac{A_2}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)\right]^{1/2}} \cdot \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$

Para escoamento com atrito a vazão ideal deve ser corrigida através da utilização de um coeficiente de descarga dado por,

$$C = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{idal}}$$

O coeficiente de descarga C não é constante, podendo depender fortemente da geometria do escoamento e do número de Reynolds do escoamento.

Para escoamento compressível de um gás ideal, podemos utilizar a seguinte equação de estado,

$$p = \rho RT$$

onde T é a temperatura absoluta do gás e R é a constante do gás.

Para um escoamento adiabático reversível de um gás ideal, a equação da energia (1ª lei da termodinâmica) fornece,

$$c_p T_1 + \frac{V_1^2}{2} = c_p T_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

onde c_p é o calor específico à pressão constante. Combinando as duas equações,

$$\dot{m} = 2A_2^2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p_1^2}{RT_1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]$$

Na expressão acima a velocidade na seção 1 foi considerada desprezível. Esta equação pode ser simplificada para,

$$\dot{m}^2 = \sqrt{\frac{2}{RT_1}} A_2 \left[p_2 \Delta p - \left(\frac{1,5}{\gamma} - 1 \right) \Delta p^2 + \dots \right]^{\frac{1}{2}}$$

com $\Delta p = p_1 - p_2$ e $\gamma = c_p/c_v$. Esta equação é válida para $\Delta p < p_1/4$. Quando $\Delta p < p_1/10$, uma equação mais simplificada pode ser escrita,

$$\dot{m} = A_2 \sqrt{\frac{2p_2}{RT_1} (p_1 - p_2)}$$

Normalmente define-se,

- Fator de velocidade de aproximação: $M = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$

- Razão de diâmetros: $\beta = \frac{d}{D} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$

Três tipos de medidores baseados neste princípio são mais utilizados:

Normalmente, os cálculos para estes medidores são realizados baseados nas seguintes expressões:



Venturi



Bocal



Placa de Orifício

- Para Venturi, Bocal e Orifício, fluido incompressível:

$$\dot{m}_{real} = C M A_2 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$

- Para Venturi, Bocal e Orifício, fluido compressível:

$$\dot{m}_{real} = Y C M A_2 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$

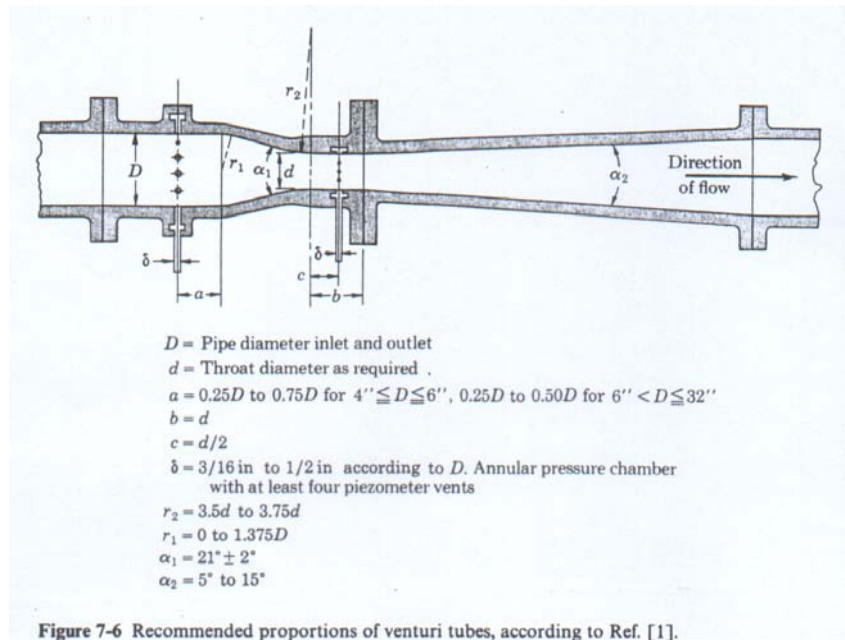
onde Y é o fator de expansão fornecido pelas normas. Ver as referências [1] e [2].

10.1 - Considerações Práticas para Medidores por Diferença de Pressão

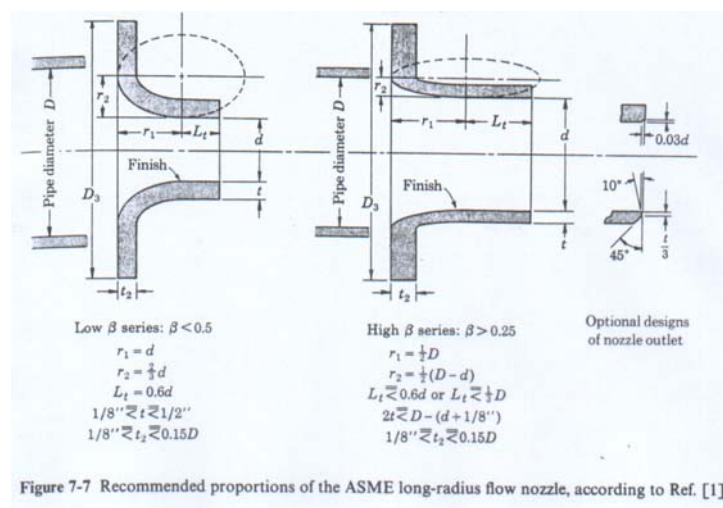
Cada um pode construir seu próprio medidor de vazão por diferença de pressão. Mas, para sua utilização será necessário um processo de calibração onde o coeficiente de descarga deverá ser determinado experimentalmente. Uma alternativa normalmente empregada é seguir as normas publicadas pela ASME [1]. Os medidores construídos de

acordo com a norma não exigem calibração, uma vez que os coeficientes de descarga são fornecidos para cada tipo de medidor.

- **Venturi padrão ASME**



- **Bocal padrão ASME**



- Placa de Orifício padrão ASME

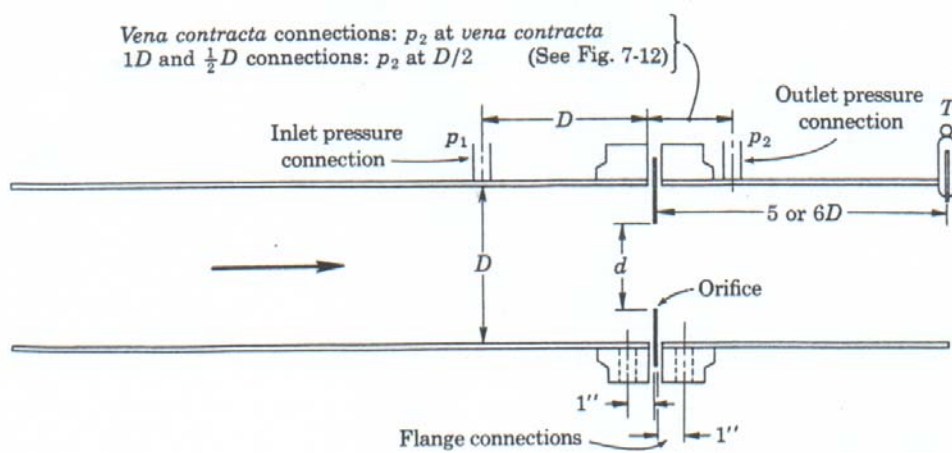


Figure 7-8 Recommended location of pressure taps for use with concentric, thin-plate, square-edged orifices, according to Ref. [1].

- Coeficiente de Descarga para Venturi ASME

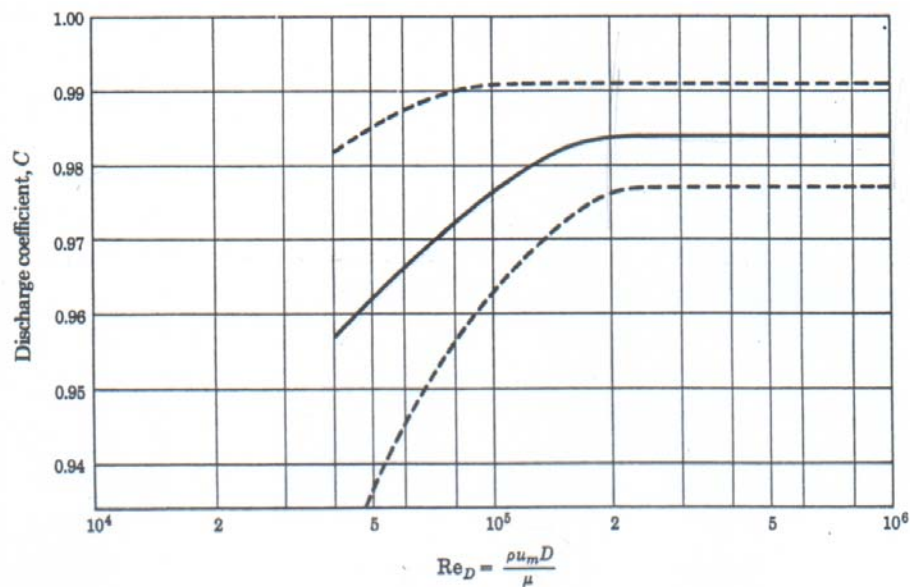


Figure 7-9 Discharge coefficients for the venturi tube shown in Fig. 7-6, according to Ref. [1]. Values are applicable for $0.25 < \beta < 0.75$ and $D > 2$ in.

- Coeficientes de Descarga para Bocal ASME

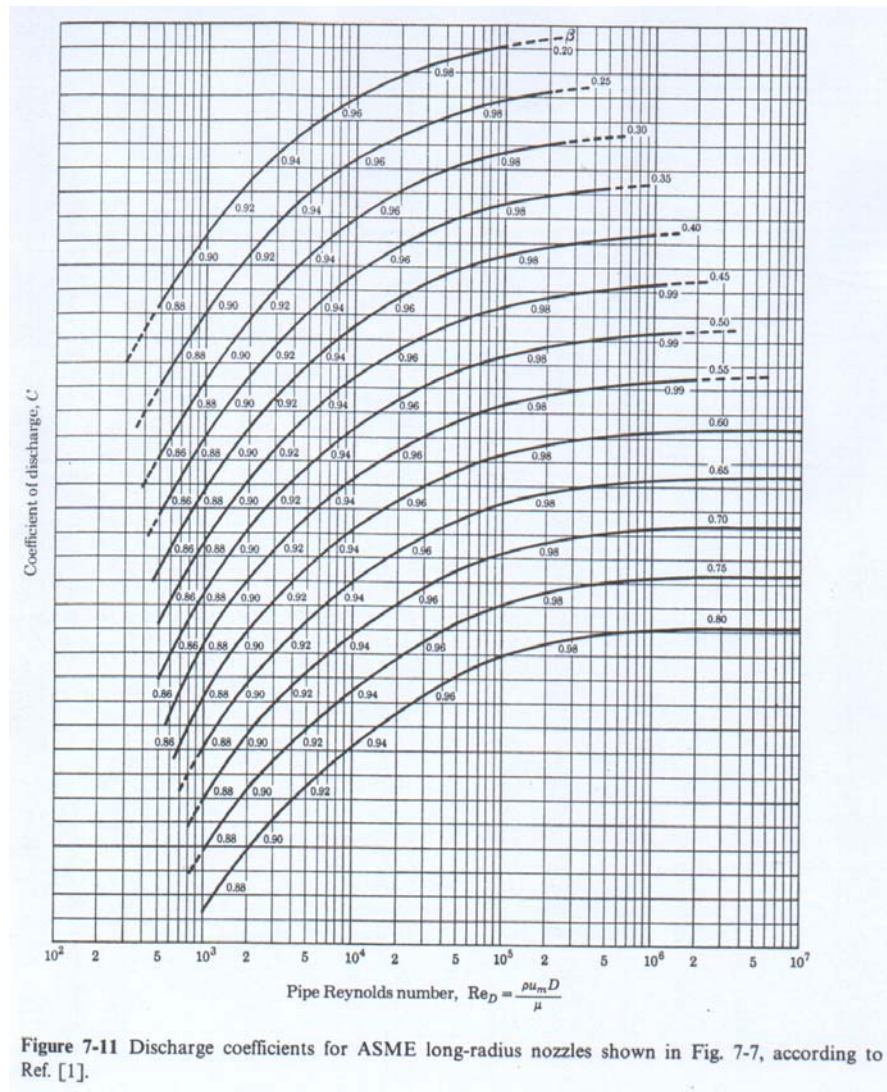
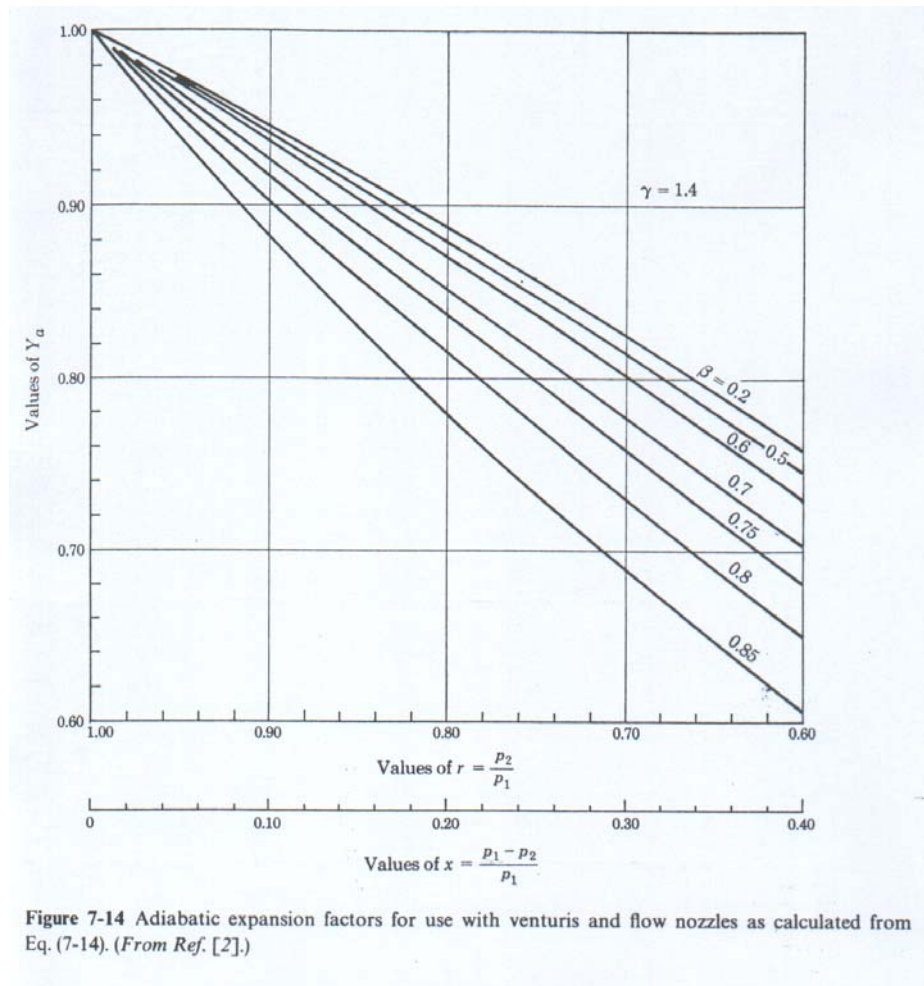


Figure 7-11 Discharge coefficients for ASME long-radius nozzles shown in Fig. 7-7, according to Ref. [1].

- Fator de expressão adiabático para Venturi e Bocais



Para a placa de orifício com tomadas de pressão de D e $\frac{1}{2}D$, Benedict [2] recomenda a seguinte expressão para o coeficiente de descarga,

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \cdot \left[\frac{10^6}{\text{Re}_d \beta} \right]^{0,75} + \frac{0,09\beta^4}{1 - \beta^4} - (0,0337) \cdot (0,47)\beta^3$$

$$\text{com } \text{Re}_d = \frac{\rho V_2 d}{\mu}.$$

11. Bocais Sônicos

Bocais operando com gases com velocidades elevadas podem atingir condições sônicas ($M=1$) na garganta. Nestas condições dizemos que o escoamento está engasgado, e a vazão é máxima para uma dada condição de entrada.

Para um gás ideal com calores específicos constantes, pode-se mostrar que a razão de pressões para atingir-se condições críticas na garganta é dada por (escoamento considerado isentrópico),

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma + 1}}$$

com $\gamma = c_p / c_v$.

Substituindo-se esta relação na equação para escoamento compressível derivada anteriormente temos,

$$\dot{m} = A_2 p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_1}} \cdot \left[\frac{\gamma}{\gamma + 1} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{2}{\gamma - 1}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Se garantirmos que o bocal está operando com $\frac{p_2}{p_1} < \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{crítico}$, podemos aplicar

a equação acima para determinar a vazão. Note que para estas condições o escoamento depende apenas das condições à montante (p_1, T_1), que são fáceis de serem obtidas.

Estes bocais oferecem grande resistência ao escoamento.

A vazão ideal pela expressão acima deve ser corrigida por coeficientes de descarga experimentais [2]. Normalmente estes coeficientes são próximos de 1 (~ 0.97).

12. Referências

Existem inúmeras publicações sobre o assunto medição de vazão. A seguir são apresentadas três referências básicas.

- [1] ASME *Fluid Meters, Their Theory and Application*, 6th edition, New York, 1971.
- [2] R.P. Benedict, *Fundamentals of Temperature Pressure, and Flow Measurements*, 3rd edition, John Wiley and Sons, 1984.
- [3] Holmann, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw Hill, 7th edition, New York, 2000.
- [4] ASME PTC 19.5-2004. Flow Measurements, Performance Test Codes